

福井大学
工学部 研究報告
第24巻 第1号
昭和51年3月

油剤付着繊維の動的摩擦接触面の観察

古 島 昭 雄^{*}

Some Dynamical Observations of Friction Contact of Lubricated Fiber

Teruo FURUSHIMA

(Received Oct. 15, 1975)

Frictional force under hydrodynamic condition is given from area, thickness, viscosity and shear rate of lubricant film. The area of lubricant film has been measured experimentally in this study. Cylindrical lens rubbed with lubricated P. E. T. fiber has been observed under the optical microscope using light from stroboscope. The photographic pictures have been taken at suitable intervals of time using strobostreak camera. The following results were obtained.

- 1) Increase in frictional force with increasing addition % of lubricant is explained by viscosity of liquid phase of lubricant.
- 2) Area of lubricant film is given by one-valued function of viscosity, speed and load. This is similar in behavior to the friction under hydrodynamic condition.
- 3) Decrease in friction with increasing speed at high speed and high viscosity is attributed to heating and slipping of lubricant film.

1. 緒 言

多くの繊維は給油されて機械加工を受けるが、油剤が液体で加工速度が大きいときは流体潤滑またはそれに近い摩擦状態となることが予想される¹⁾。そのような摩擦状態では摩擦面に作られる油膜の面積と厚み及び粘度とせん断速度が与えられれば概ね摩擦は決定される。粘度と速度は外的条件として与えることができるから、面積と厚みを知ることができればよい。本報ではこれら後者を測る試みをした。しかし面積はとも

かく、厚みのわずかな変動を知ることはできなかった。しかして以上の計測から流体潤滑が支配的な状態における摩擦挙動の説明を試みることができた。なお摩擦面の状態は時々刻々変わるものであるから、各瞬間の状態をとらえるようにした。

2. 実 験

2.1 実験装置

軽いドラムに巻かれた試料繊維は滑車、ガイドによ

* 附属繊維工業研究施設

って位置を調整されながら引き出され、半径 1.5mm のシリンドリカル・レンズと摩擦接触したのち、張力測定用の滑車を通り、所定速度の回転ドラムによって巻き取られる。シリンドリカル・レンズとの接触でできた油膜は顕微鏡によって観察される。照明は落射照明とし、光源にはストロボスコープを用いた。シリンドリカル・レンズの一端は顕微鏡のピントがずれないように、摩擦方向にのみ動くようになっている。他端にはストレン・ゲージを接続し摩擦力を測ることができる。レンズに対する繊維の巻き付け角は 0.134 ラジアンとし、繊維の張力によって接触荷重を発生させた。張力もストレン・ゲージによって検出した。以上の要点を図 1 に示す。

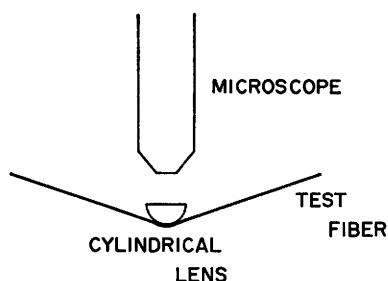


図1 摩擦接触面観察の原理

以上は油膜面積を測るときであったが、油膜の厚みを測るためにはこの側方を観察すればよい。そのためにはレンズの軸を顕微鏡と同方向になおした。

2.2 供試材料

試料繊維としては P. E. T. 20d（テトロン・モノフィラメント）を用いた。付着油剤としては粘度の高いものを用い、油剤の粘性流体としての作用が強くなるようにした。こうすることによってすべり速度を高

表1 油剤の組成と粘性係数、粘度の温度依存性
 m は $\mu = \mu_0 e^{-mt}$ における係数、 t は基準温度に対する上昇温度、 μ は温度上昇後の粘性係数、 μ_0 は基準温度における粘性係数

油 剤 の 組 成	20°C における粘性係数 (poise)	m (1/°C)
流動パラフィン65% ポリブテン 35%	26.1	0.088
流動パラフィン28% ポリブテン 72%	186	0.095
ポリブテン	2070	0.101
シリコンオイル	1060	0.017

くする困難を回避することができる。使用油剤の粘性係数および温度特性を示す係数を表 1 に示す。石油系の油剤に対し温度特性の違う油剤としてシリコン油も用意した。

試料の調整法はすでに発表してある他の摩擦実験と同じとした²⁾。すなわち、試料繊維は小さなわくにいったん巻き、トリクレンで 3 分×3 回洗浄する。トリクレンで希釈した油剤を付着させ、自然乾燥させ翌日実験に供する。油剤付着量はことわりのない限り繊維重量に対し 4% とした。

2.3 実験方法

実験に先きだち試料繊維とふれる所はトリクレンまたはアルコールで拭いてきれいにする。摩擦測定結果の時間による変化を示す 1 例を図 2 に示す。これから

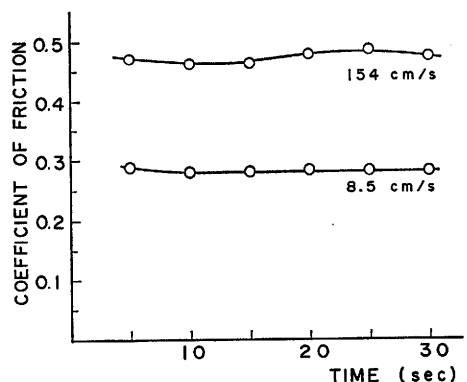


図2 測定開始からの時間に対する摩擦係数の変化
油剤粘性係数 26.1 poise, 荷重 0.67g

測定開始からの時間は摩擦に影響しないことが明らかとなった。一方摩擦面の観測からしごかれた油剤がレンズ面にたまるのに時間を必要とする。したがって測定値の採集は測定機の運転開始から20秒後に始めることにする。

接触荷重は 0.67g を標準とし、張力の調節により与える。またすべり速度は 1.96cm/s, 8.5cm/s, 34.6cm/s, 154cm/s の4通りを用いる。ストロボの点滅は 5pulse/s とし、流しカメラによって摩擦面の顕微鏡写真を撮影した。同じ実験を3回行ない、合計約100この写真をとり、油膜面積の平均等を求めた。摩擦力、張力も同時に求め平均して摩擦力、荷重とする。

油膜厚みの測定は顕微鏡中に基準点をもうけ、そこからの距離の変化を測った。

3. 結 果

3.1 油膜形成状態

油膜面のストロボ写真の典型的な例を図3に示す。

図3 a は流動 パラフィン65%ポリブテン35% (26.1

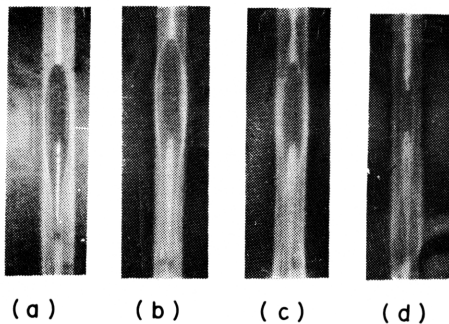


図3 油膜形成状態

- (a) 26.1 poise, 1.96cm/s
- (b) 186 poise, 1.96cm/s
- (c) 186 poise, 8.5 cm/s
- (d) 2070 poise, 8.5 cm/s

poise) を油剤として4%付着させ、荷重 0.67g, すべり速度 1.96cm/s の場合で、すべり方向は上から下へととなっている。なお繊維直径は 45μ である。シリンドリカル・レンズと繊維の間が油剤で満たされていれば、光は透過されて写真は黒くうつり、そうでないところは反射光により白くうつる。繊維の運動によって入口側は油剤がしごかれてたまっているが、後半は中心部分において油剤のないところが見える。そして2筋に分かれた油剤は1つにまとまり尾を作っている。図3で (b), (c), (d) と粘度、速度が大きくなるにつれてしごかれてたまる油剤の量は少なくなっている。これは繊維が油剤のくさび作用によりレンズ面より浮上してしごかれる油量が少なくなるためと考えられる。また後半の2筋の油剤も1つにまとまることができなくなり、油量も少なくなっている。

荷重増加によって油膜面積が大きくなることは想像に難くないが、だ円状油膜の短径に対し長径の変化の方が大きいのではなかろうか。まず図4に短径の変化を示した。油剤粘度が低いときはくさび作用も小さいから油剤のしごきもすでに限界に来ていると考えられ、したがって短径の増加もあまり見られない。これに対し高粘度油の場合はくさび作用が大きく繊維は浮いた状態にあるから、短径の変化も大きい、やはり荷重の大きいところでは変化は小さくなっている。

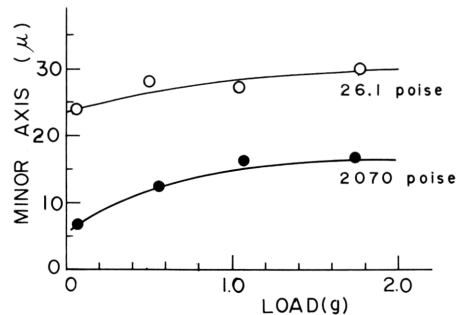


図4 油膜の短径と荷重の関係
すべり速度 8.53cm/s

つぎに長径と短径の比をとって図5に示す。本図からは法則性を見いだすことは困難である。すなわち長径と短径の比はあまり変わらず、油剤の形はほぼ一定とみなしてよいのではなかろうか。

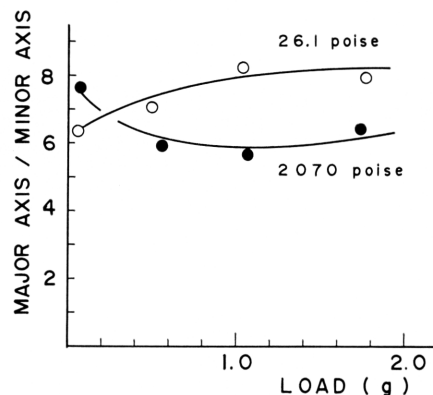


図5 油膜の長径/短径と荷重の関係
すべり速度 8.53cm/s

3.2 油剤付着量の影響

油剤付着量が少なくなれば、しごかれる油剤も少なくなるわけであるから、油膜の面積が小さくなることは想像できる。これを図6に示す。これに対応した摩擦力は繊維の場合の典型的な摩擦係数・付着量の関係を示している。付着量の増加が油剤液相の発現をもたらす、この粘性によって摩擦が大きくなるとする説明²⁾をうらずけている。油膜面積のパラッキは付着量が少ないときほど相対的に大きいわけであるが、摩擦減少を説明できるほど顕著ではない。

3.3 粘度、速度、荷重の影響

流体潤滑においては摩擦係数が油剤粘性係数 μ_0 , す

べり速度 U , 荷重 R としたとき, $\mu_0 U/R$ に対し 1 価関数として表わされるべきだといわれている。ただ摩擦発熱による粘度低下を考慮するとこれは修正さるべきであるが, ここでは見掛け粘度を用いこれを考慮しなかった。図 7 にこのへんの模様を示す。シリコン油は特別な挙動を示しているが, 他は摩擦増加後減少の傾向を示し概ね流体潤滑が支配的であることが明らかである。しかし摩擦減少は不自然に思われる。これについてはのちほど考察する。

以上に対応した油膜面積を示すと図 8 のようになった。シリコン油が特別な挙動を示すことを除けば流体潤滑における摩擦挙動と類似な傾向を示している。

上記油膜面積のパラッキを変動係数で示すと図 9 のようになった。摩擦係数や油膜面積と同様に $\mu_0 U/R$ によって与えられる 1 つの傾向を読み取ることができる。

4. 考 察

4.1 油膜厚み

摩擦力と油膜面積がわかれば, 摩擦力が油膜の粘性によって与えられると仮定してその厚みを計算によって求めることができる。厚み一様として求めた有効油

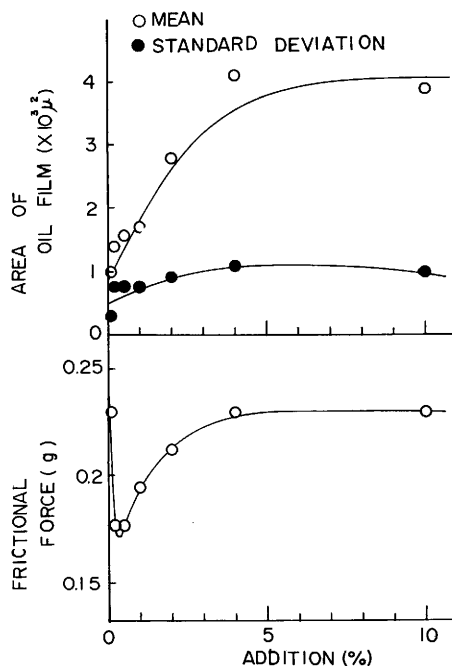


図 6 油剤付着量と油膜面積, 摩擦力の関係
油剤粘性係数 186 poise, 荷重 0.67g,
すべり速度 1.96cm/s

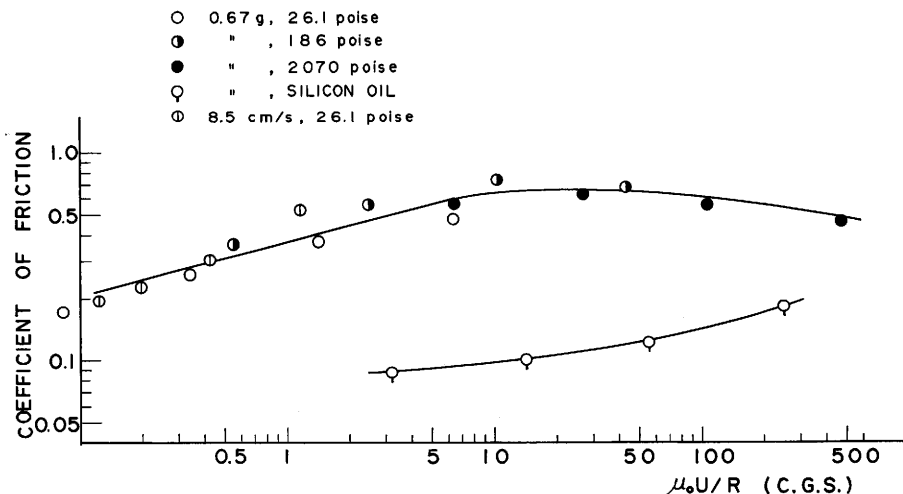


図 7 $\mu_0 U/R$ に対する摩擦係数の変化

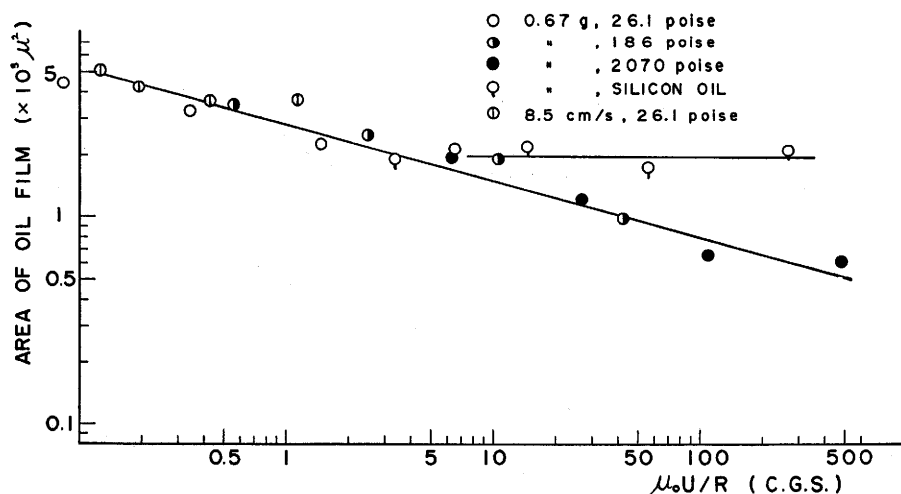


図8 油膜面積の変化

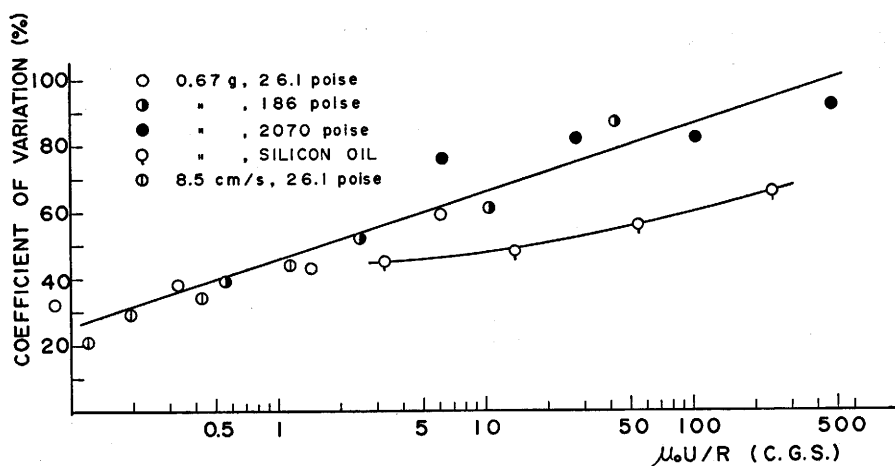


図9 油膜面積のバラツキ(変動係数)の変化

膜厚さの変化を図10に示す。シリコン油を除いて、 $\mu_0 U/R$ に対し1本のマスターカーブが描けるのは摩擦係数および油膜面積の傾向からして当然である。なお油膜をだ円とし、その外縁の厚みを一定と仮定して最小厚みを求めると、シリコン油以外の場合 $\mu_0 U/R = 100$ では有効油膜厚さとほとんど変わらず、 $\mu_0 U/R = 10, 1$ ではそれぞれ 2.2μ , 0.085μ と計算される。

以上の計算が示すところによると粘度、速度が大きいときの油膜厚さは非常に厚い。もしもこのような厚

みがあるならば実験的に十分観察可能である。そこでこのような接触状態をよこから(シリンドリカル・レンズの軸方向から)観察すると、油剤がポリブテン(2070poise)の場合速度を1.96cm/sから154cm/sまで4通り変えても厚みの変化は平均で、たかだか 1μ 以内であり分散分析の結果も有意とはならなかった。計算によると 30μ 程度の変化がなければならないから、このような高粘度、高速の条件のもとでは単純な流体潤滑とはなっていないと考えられる。同様なこと

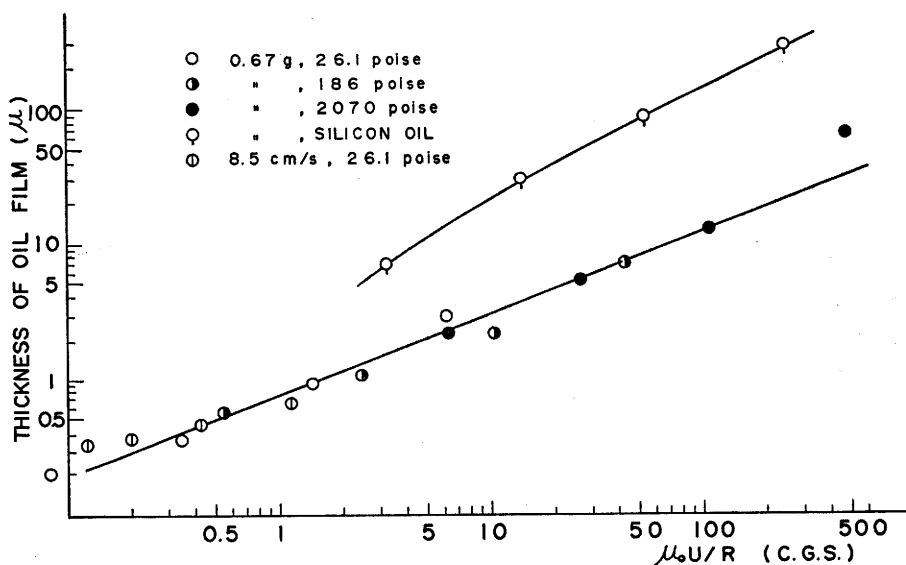


図10 有効油膜厚さの変化

がシリコン油の場合にもいえる。

粘度速度が小さいときの最小厚みは計算によると極めて薄くなるが、繊維の弾性変形を考えれば流体潤滑を可能にする厚みも不可能ではない。本実験の範囲では低速低粘度でも単純な流体潤滑になっているものと考えられる³⁾。

4.2 油膜の発熱，スリップ等について

低速低粘度域においては単純な流体摩擦を示し、油膜の厚み、面積等もこれを支持したが、高速高粘度域ではこれを修正する必要がある。すなわち高粘度の場合速度増加は摩擦を大きくするのではなくむしろ小さくする方向に作用する。これは油膜厚みの増加によっては説明できなかった。また振動的な接触がはげしくなることからの説明にも無理があるように思われる。

まず摩擦熱による油膜の温度上昇粘度低下の影響について考えてみよう。油膜面は正方形で厚みは一様、発熱および熱伝導は定常状態であるなどの仮定のもとに摩擦力を求めると³⁾、ポリブテン (2070poise) を油剤としたとき最大摩擦力は速度 25cm/s すなわち $\mu_0 U/R = 80$ (C.G.S.) で現われ、実験結果と比べ1ケタ近く大きい。また摩擦力も実験結果と比べ倍以上大きく計算される。同様な計算を流動パラフィン28%ポリブテン72% (186poise) を油剤としたときについて行なうと、速度 90cm/s すなわち $\mu_0 U/R = 25$

(C.G.S.) のとき摩擦力最大となり実験結果よりやはり大きめな計算値を示している。しかし摩擦力の最大値はほぼ同じ値となっている。速度増加に対して摩擦力の増加傾向が止まる理由を、摩擦発熱だけで説明するには十分といえないわけである。

油膜の厚みを一定としてずり速度のみあげてゆくと、油膜をはさんでいる壁 (いまの場合は繊維およびガラス) の強度を超える状態になる。実際はこれ以前に油膜がスリップするだろう。繊維の表面がこのようなして剥離する速度を推定すると摩擦増加の止まる速度に近い³⁾。しかしシリコン油においては油膜のスリップが顕著に起こるのではなかろうか。このようなスリップのため油剤によるくさび作用も弱く、繊維の浮上も小さく、かつ速度に影響されないためしごき出される油剤も一定で、油膜面積も変化していない。なおシリコン油は温度による粘度変化の少ない油剤であるが、ここではこの性質よりもスリップの方が顕著な影響を示している。

5. 結 言

油膜面積と厚みの測定を種々な条件で試みたが、後者の微妙な変化は測定できなかった。しかし前者の測定から、

- 1) 油剤付着量の増加によって摩擦が増加するのは油剤液相の発現による粘性のためであること、
- 2) 粘度、速度、荷重に関しては油膜面積も流体潤滑

滑類似の挙動を示し、摩擦挙動が流体潤滑であることを支持していることが明らかとなり、

3) 高速高粘度域における速度増加に対して摩擦増加が止まる現象を油膜の発熱と油膜のスリップから説明できるとした。

本研究は財団法人繊維工業研究協会の研究助成に負うところが大きいことを付記し、ここに深謝の意を表す。また実験に協力された卒研究生吉田誠二、林修の両君に感謝する。試料繊維をいただいた帝人K.K.,

油剤を御紹介いただいた東京工業大学桜井教授に感謝する。

文 献

- 1) W. W. Hansen, D. Tabor ; Text. Res.J., 27, 300 (1957)
- 2) 古島昭雄 ; 福井大繊維研報告, 12, 35 (1974)
- 3) 〃 ; 〃 , 投稿予定